CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Sélection des équipements de manutention: revue de littérature

Moustapha Ahmed Bouh
Diane Riopel

December 2015

CIRRELT-2015-62

Bureaux de Montréal :
Université de Montréal
Pavillon André-Aisenstadt
C.P. 6128, succursale Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :
Université Laval
Pavillon Palasis-Prince
2325, de la Terrasse, bureau 2642
Québec (Québec)
Canada G1V 0A6
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Université Laval · McGill · Concordia · ÉTS · UQÀM · HEC Montréal · Polytechnique Montréal · Université de Montréal

Sélection des équipements de manutention : revue de littérature

Moustapha Ahmed Bouh*, Diane Riopel*

Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT) et Département de mathématique et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3A7

Résumé. Cet article présente une revue de littérature (27 articles) des 30 dernières années (1985-2015) sur la sélection des équipements de manutention. Les concepteurs des systèmes de manutention disposent de peu d'outils d'aide à la décision génériques pour faire le choix des équipements de manutention optimal pour les opérations de manutention spécifiques dans une usine ou dans un entrepôt logistique. Trois choix leur sont imposés actuellement : (1) utiliser ses propres expériences dans le domaine en cherchant dans les livres et les aides mémoires de la manutention, (2) se fier à un vendeur d'équipements et à ses catalogues, (3) solliciter les recommandations d'un consultant externe [Chan et al., 2001]. Les quelques méthodes développées dans la littérature sont des algorithmes, des systèmes experts, des systèmes hybrides, des méthodes d'aide à la décision multicritère, et des approches-cadres systémiques. Elles présentent un certain nombre de défauts qui sont discutés dans cette revue de littérature. La portée de chaque article avec son champ d'application est analysée. Le but ultime étant de reconnaitre les limites et d'indiquer les pistes de recherche.

Mots-clés. Équipements de manutention, propriétés logistiques, méthodes de sélection, revue de littérature.

Remerciements. Ce projet de recherche a reçu un support financier du programme de subventions à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Ce support est grandement apprécié.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

---

* Auteurs correspondants: Moustapha.AhmedBouh@cirrelt.ca
Diane.Riopel@cirrelt.ca

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec,
Bibliothèque et Archives Canada, 2015

© Ahmed-Bouh, Riopel et CIRRELT, 2015

1 INTRODUCTION

La manutention est perçue comme un mal nécessaire dans le jargon de la logistique. Certains disent que c'est une activité sans valeur ajoutée. Son absence coûte à l'entreprise, il en est déduit que la fonction qu'elle remplit possède une certaine valeur. Il s'agit, précisément, d'une valeur d'échange (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983). Toutefois, il est d'usage de chercher à éliminer ou limiter les mouvements de manutention dans l'entrepôt et l'usine, soit en réduisant les distances, soit en les combinant avec d'autres activités, ce qui permet de rationaliser la conception du système de manutention. Pour ce faire, il revient à choisir, dans une première phase, les équipements de manutention qui seront capables de réaliser les objectifs de performance, de fiabilité, de flexibilité, de contrôlabilité, d'exactitude et bien sûr de coûts d'opération et d'investissement. Beamon (1998) a fait une revue de littérature des recherches sur les techniques de mesure de la performance et la fiabilité des systèmes de manutention. Les méthodes de justification des coûts sont largement accessibles dans les livres, comme celui de Tompkins, White, Bozer et Tanchoco (2010). Il faudrait connaitre les équipements convenables à une situation donnée de manutention avant de comparer leurs performances. Les ingénieurs de conception disposent de peu d'outils d'aide à la décision génériques pour sélectionner des équipements de manutention convenables pour les opérations de manutention spécifiques dans une usine ou dans un entrepôt logistique. Ils se retrouvent entre trois options : (1) utiliser ses propres expériences dans le domaine en cherchant dans les livres et les aides mémoires de la manutention, (2) se fier à un vendeur d'équipements et à ses catalogues, (3) solliciter les recommandations d'un consultant externe (Chan et al., 2001). Chacune des trois options ci-dessus est limitée. Lorsque les concepteurs comptent sur leurs vécus et leurs expériences de travail pour faire le choix des équipements de manutention, ils choisissent les équipements avec lesquels ils sont familiers. Cette façon de faire est adaptée lorsque le contexte est similaire au vécu de l'entreprise. Les mêmes méthodes sont gardées et les changements sont rares. Aucune garantie sur le choix de l'équipement optimal n'est faite. Concernant les vendeurs, ils ont généralement tendance à être subjectifs en voulant écouler les stocks de leurs entreprises. Les propositions seraient parfois biaisées à cause des conflits d'intérêts. Si l'équipement optimal à un problème donné n'est pas dans le catalogue du commercial, il lui est difficile de recommander une technologie qu'il ne vend pas. Pour ce qui est du recours aux conseils des consultants externes, il représente un coût additionnel. De plus, les consultants sont souvent spécialisés dans des secteurs particuliers.

Selon la revue de littérature ici faite (27 articles) des 30 dernières années (1985-2014) sur les méthodes de sélection des équipements de manutention, quelques systèmes ont été développés pour cette tâche. Ils permettent de sélectionner un équipement pour une activité de manutention déterminée en usine ou en entrepôt. Ils ne sont pas nombreux. C'est un domaine qui n'attire pas beaucoup d'attention à la différence des autres aspects de la conception ainsi que l'exploitation d'entrepôt (Gu, Goetschalckx, & McGinnis, 2010; Welgama & Gibson, 1995). Tuzkaya, Gülsün, Kahraman et Özgen (2010) et Park (1996) affirment que le problème est particulièrement ignoré lorsqu'il s'agit de la sélection d'équipements en entrepôt. Certains articles généralisent la situation en incluant les entrepôts logistiques, pendant que d'autres se concentrent sur les usines.

Dans un premier temps, les définitions nécessaires sont fournies pour délimiter le contexte de l'analyse. Ensuite, les méthodes et les systèmes développés sont traités. Les méthodes de validation utilisées sont analysées, suivies d'une comparaison et de critiques. Finalement, une conclusion et des discussions sur les pistes de recherche sont faites.

2 ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION ET EQUIPEMENTS CONNEXES

Pour parler des équipements de manutention, il est nécessaire de définir la notion de « manutention ». Parfois, elle est considérée comme étant le fait d'acheminer le produit d'un point à un autre, tout en l'entreposant sur des palettiers ou le manipulant (Matson & White, 1982). Cependant, il y a une différence entre la manipulation des produits, leur manutention, leur transport, et leur entreposage. La manutention est l'action de déplacer automatiquement, mécaniquement ou manuellement, à l'aide d'appareils de manutention, des produits sur une faible distance et généralement à l'intérieur du bâtiment (Riopel, 2012). Par contre, la manipulation est « l'action de déplacer automatiquement, mécaniquement ou manuellement des produits dans un poste de travail. Le transport est le déplacement extérieur des marchandises sur de longues distances vers d'autres lieux. L'entreposage est l'action de regrouper et de disposer des marchandises constituant les stocks dans des conditions matérielles favorables à leur conservation et à leur prélèvement » (Riopel & Croteau, 2013).

2.1 Équipements de manutention

Les équipements de manutention traités dans les articles scientifiques de recherche sur leur sélection sont groupables sous sept catégories.

- Appareils de levage : « appareils capables d'exercer sur une charge une traction ou une poussée de bas en haut dans un plan vertical ou presque, et de pouvoir éventuellement la déplacer d'un emplacement à un autre » (Riopel & Croteau, 2013).
- Chariots de manutention : « appareils manuels ou motorisés qui permettent de manutentionner des charges. Ils regroupent les chariots manuels (ex. : diable, gerbeur manuel, transpalette manuel, transplateforme manuelle) et les chariots motorisés (ex. : chariot élévateur, gerbeur motorisé, transpalette motorisé, transplateforme motorisée » (Riopel & Croteau, 2013).
- Équipements de canalisation : « tuyauteries dans lesquelles circule un fluide » ("Canalisation," 2012).
- Robots de manutention : « robots manipulateurs industriels dont les caractéristiques techniques et les organes terminaux effecteurs font qu'ils peuvent être affectés à des tâches qui impliquent la saisie et le déplacement d'objets sur de courtes distances » (Riopel & Croteau, 2013).
- Systèmes de véhicules à guidage automatique : « véhicules sans conducteur qui se déplacent dans les installations en suivant une trajectoire prédéterminée et qui servent à manutentionner du matériel, des outils ou tout autre objet. Le déplacement des véhicules dans les installations est assuré par un système de communication et un système de guidage qui font appel à l'informatique embarquée » (Riopel & Croteau, 2013).
- Transporteurs/convoyeurs pour charge isolée : « appareils de manutention continue dont les structures reposent généralement sur le sol et qui effectuent le déplacement des charges isolées principalement à l'aide de rouleaux, de galets, d'une courroie ou d'une bande sans fin, de chaînes, de l'air, de vis sans fin ou d'une hélice. Les transporteurs peuvent être en circuit ouvert. Les termes transporteur et convoyeur sont souvent pris l'un pour l'autre, mais ils ne sont pas synonymes. En effet, la structure du convoyeur est généralement aérienne : il sert au déplacement de charges au-dessus du sol à l'aide d'une série de petits chariots circulant le long d'une voie, tous ces chariots étant directement rendus solidaires au moyen

d'une chaîne ou d'un câble qui leur communique le mouvement. Les charges à manutentionner sont suspendues aux chariots directement par des crochets ou des pinces, ou par l'intermédiaire de plateaux, de balancelles ou de tout autre dispositif destiné à suspendre une charge. Un tel dispositif fonctionne toujours en circuit fermé. Cette catégorie d'appareils en comprend également d'autres qui utilisent la technique des convoyeurs à chaîne, tel le convoyeur au sol tracteur de chariots, dont la structure n'est pas aérienne. Malgré toutes ces considérations, l'usage actuel tend à vouloir consacrer le terme convoyeur pour désigner ces deux réalités » (Riopel & Croteau, 2013).

- Transporteurs/convoyeurs pour charge en vrac : ces équipements ont la même définition que les transporteurs/convoyeurs pour charge isolée sauf que les produits manutentionnés sont en vrac (Riopel & Croteau, 2013).

2.2 Équipements connexes

D'autres équipements qui sont des accessoires ou des systèmes connexes sont étudiés dans certains articles de recherche sur la sélection des équipements de manutention. Ils sont groupables sous sept catégories.

- Équipements de préhension : « dispositifs qui sont montés généralement sur le tablier porte-fourche d'un chariot élévateur pour en augmenter les possibilités de préhension (ex. : éperon, fourche, pince multibaril, potence à col-de-cygne et pousseur-tireur de charge) » (Riopel & Croteau, 2013).
- Appareils d'identification et de communication (numériseur, imprimante et terminal).
- Manipulateurs : « des mécanismes qui sont généralement composés d'éléments en série, articulés ou coulissants l'un par rapport à l'autre, destinés à saisir et à déplacer des objets suivant plusieurs degrés de liberté. » (ex. : dispositifs culbuteurs, distributeur, équilibreur de charge, plateau diviseur, porte-pièce, table tournante) (Riopel & Croteau, 2013).
- Systèmes de tri : « systèmes de manutention qui sont conçus pour effectuer des opérations de tri. Ils sont constitués, par exemple, d'un ensemble d'installations regroupées en quatre sections. Les deux sections principales sont la section d'identification et la section de répartition. Les deux autres sections (section convergente et section divergente) peuvent être présentes ou non selon les besoins de l'entreprise » (Riopel & Croteau, 2013).
- Unités de charges : « unité de mesure qui représente une quantité quelconque pour la manutention ou le transport » (Riopel & Croteau, 2013).

3 METHODES DE SELECTION

Les méthodes développées dans la littérature sont des algorithmes, des systèmes experts, des systèmes hybrides, des méthodes d'aide à la décision multicritère, et des approches-cadres systémiques. Le Tableau 1 regroupe les 26 articles selon les méthodes de sélection utilisées. Le 27^{e} article fait une comparaison des systèmes experts. Un résumé de chacune d'elle s'en suit.

La première colonne du Tableau 1 contient les articles classés par méthode utilisée et par ordre chronologique du plus ancien au plus récent. La deuxième colonne indique si le système de sélection des équipements de manutention proposée par l'article est un système destiné à une usine ou à un entrepôt. Le système est dit destiné aux usines (12 sur 26 articles) parce que souvent les auteurs précisent le contexte de recherche comme étant des ateliers de fabrication. Il est aussi dit destiné aux entrepôts (2 sur 27 articles) par précision des auteurs. Certains systèmes sont dits adaptés à la fois aux entrepôts et aux usines (12 sur 27 articles), soit parce que cela est précisé dans le texte soit par leur caractère général de la définition du problème traité. Le 27^{e}

article analysé dans cette revue de littérature est un article, comme déjà dit plus haut, qui compare les performances de certains systèmes experts développés pour la sélection des équipements de manutention. Ce dernier est analysé dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 1 : Méthodes de sélection

Méthode Auteurs [date]	Recherche adaptée à
Modèle d'optimisation	
Hassan et al. [1985]	Usine
Velury et Kennedy [1992]	Usine
Raman et al. [2009]	Entrepôt/Usine
Telek [2013]	Entrepôt/Usine
Système expert	
Fisher et al. [1988]	Usine
Malmborg et al. [1989]	Entrepôt/Usine
Trevino et al. [1991]	Entrepôt
Matson et al. [1992]	Usine
Bookbinder et Gervais [1992]	Entrepôt/Usine
Park [1996]	Entrepôt/Usine
Kim et Eom [1997]	Usine
Chan et al. [2001]	Entrepôt/Usine
Fonseca et al. [2004]	Usine
Kulak [2005]	Entrepôt/Usine
Système hybride	
Welgama et Gibson [1995]	Usine
Mirhosseyni et Webb [2009]	Usine
Système basé sur la connaissance	
Gabbert et Brown [1989]	Usine
Chu et al. [1995]	Entrepôt/Usine
Yaman [2001]	Usine
Cho et Egbelu [2005]	Entrepôt/Usine
Méthode d'aide à la décision multicritère	
Chakraborty et Banik [2006]	Entrepôt/Usine
Onut et al. [2009]	Entrepôt/Usine
Tuzkaya et al. [2010]	Entrepôt
Maniya et Bhatt [2011]	Usine
Approche-cadre systémique	
Sharp et al. [2001]	Usine
Hassan [2010]	Entrepôt/Usine

3.1 Modèle d'optimisation

Hassan, Hogg et Smith (1985) modélisent mathématiquement le problème de sélection des équipements de manutention en minimisant les coûts d'opération et d'investissement des équipements. L'algorithme a été exécuté sur 4 exemples fournis par Webster (1969). Les auteurs affirment que les résultats sont meilleurs en matière de temps d'exécution et de performance.

Toutefois, ils laissent savoir que l'applicabilité réelle de l'outil est faible puisqu'il reflète en partie la problématique de sélection d'équipement en travaillant seulement avec les facteurs quantitatifs tels que les coûts, et omettant les facteurs qualitatifs. Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été utilisées concernant, entre autres, les chemins et les distances définis par l'implantation de l'usine.

L'article de Velury et Kennedy (1992) présente un modèle mathématique permettant de faire la sélection des équipements de manutention pour les produits en vrac. La démarche proposée utilise la programmation en nombre entier et tient compte des critères économiques et environnementaux en plus des contraintes des produits, du milieu et des équipements. Le modèle d'optimisation minimise les coûts fixes et variables de manutention et le coût de transport. Les moyens d'entreposage sont supposés définis et il reste à choisir les équipements de transport et de manutention. Le modèle tient compte par ailleurs dans la résolution des facteurs de compatibilité de l'équipement avec les autres ainsi que sa capacité, la demande, et le budget. Néanmoins, le modèle est simplifié avec les hypothèses, mais il pourrait se rapprocher plus de la réalité du terrain.

Raman, Nagalingam, Gurd et Lin (2009) vont au-delà de la sélection d'équipements de manutention et traitent le problème de détermination du nombre d'équipements nécessaires pour un cas d'usine. Les méthodes existantes pour résoudre ce problème sont, soit la simulation, soit l'optimisation mathématique. Ces dernières veillent à minimiser les coûts d'opération et d'investissement, ou maximisent l'utilisation des équipements. Ils proposent plusieurs fonctions objectifs. Certaines se basent sur les critères de performance des équipements comme le pourcentage de travail complété, le taux de sortie, le temps total de manutention sur le temps total disponible, et le temps de déplacement. L'approche proposée se déroule sur deux étapes : une approche analytique permettant de trouver une solution préliminaire, et un modèle intégrant les facteurs comme le coût et la performance. L'article ne spécifie pas l'étape de sélection des équipements, mais aborde directement la détermination de leur nombre dans un système de manutention.

Telek (2013) propose une méthode de présélection d'équipements applicable à tous les systèmes de manutention, peu importe leur degré de complexité. Il rappelle aussi le manque d'une méthode universelle de conception de système de manutention. La démarche proposée est une formule mathématique permettant de vérifier si l'équipement répond au mieux aux exigences de la tâche de manutention. Mais, la validation scientifique des résultats n'est pas illustrée dans l'article.

En comparant ces quatre solutions, deux blocs se distinguent : un groupe datant de plus de 25 ans (Hassan et al., 1985; Velury & Kennedy, 1992) et un autre groupe plus récent (Raman et al., 2009; Telek, 2013). Or, l'article de Raman et al. (2009) traite un problème similaire au problème traité par Hassan et al. (1985). Certes, les méthodes et les résultats sont différents, mais l'objectif poursuivi dans les deux cas est la sélection des équipements de manutention pour un système manufacturier en minimisant les coûts d'opération et d'investissement, et en maximisant leurs taux d'utilisation. Le choix des équipements est fait en se basant sur les temps d'opération des équipements et des temps disponibles. Chacune des solutions possède une particularité. Raman et al. (2009) tiennent compte des temps de chargement et déchargement, de voyage, et d'arrêt, alors que Hassan et al. (1985) se limitent au temps de voyage entre départements en utilisant les distances horizontales divisées par les vitesses des équipements. Les deux articles cherchent à déterminer la quantité d'équipements de manutention à mettre en œuvre. Néanmoins, selon les références du plus récent article datant de 2009, il est à noter que l'article de 1985 n'est pas cité.

Sa plus ancienne référence date de 1994. Pourtant, il s'agit d'un approfondissement du premier travail.

D'autre part, Telek (2013) essaye de résoudre les énigmes autour de la modélisation mathématique du problème de sélection des équipements de manutention. Comme ces collègues de cette famille de méthode, il aborde la question plus largement en commençant par la conception du système de manutention entier. Il cherche à proposer une nouvelle approche de conception et son travail n'est pas tout à fait finalisé. En revanche, le croquis du modèle de conception proposé identifie plusieurs étapes successives avant d'avoir un système de manutention optimale. La première étape est appelée « la présélection des équipements ». Même si l'auteur n'a pas spécifié les différents types d'équipements et leurs propriétés logistiques (caractéristiques de l'unité de charge, du mouvement de transfert à effectuer, de l'équipement nécessaire, et de l'environnement de travail), il parle de trois types de paramètres : flux de charges, restriction et équipement. En plus, il distingue ces paramètres selon trois groupes : des paramètres qui prennent des valeurs numériques, des paramètres à valeurs transformables en numérique, et des paramètres à valeurs non transformables en numérique. En utilisant les paramètres à valeurs numériques des deux types : flux de charges et équipement, il arrive à proposer une formule mathématique qui met en relation ces différents paramètres. Ceci lui permet de calculer le taux de réponse de chaque équipement aux exigences de la tâche de manutention. L'équipement qui obtient la plus grande valeur est le plus convenable à la fonction. Ce travail est une première étape de la recherche entamée par l'auteur selon sa conclusion.

3.2 Système expert

Le système expert de Fisher, Farber et Kay (1988) s'appelle MATHES *(MATerial Handling Equipment Selection)*. Il veille à sélectionner un équipement qui est techniquement et économiquement approprié au mouvement des unités de charge. Ce système est composé de trois éléments : une base de connaissances qui contient les règles du système et une formulation de l'objectif, un moteur d'inférence qui contrôle le mécanisme de recherche, et une mémoire cache qui contient les valeurs courantes des paramètres et les noms des types d'équipements déjà sélectionnés. Il utilise quatre types de règles : règles de la matrice des paramètres, règles de la matrice d'incertitude, règles de détermination des paramètres directs et inférés, et règles de sélection d'équipement. Néanmoins, MATHES se limite à la manutention intra-usine sans les mouvements verticaux. Il s'arrête au type d'équipement et ne va pas jusqu'à proposer un modèle spécifique. Les règles heuristiques de MATHES sont élaborées après consultation d'une seule personne, M. Tompkins en l'occurrence. Ces règles se vérifient sur tous les équipements disponibles un par un, ce qui est fastidieux. Le système ne traite pas aussi les cas des entrepôts.

De leur côté, Malmborg, Krishnakumar, Simons et Agee (1989) proposent un autre système expert appelé EXIT *(Expert system for Industrial Trucks)* programmé en Turbo Prolog et exécuté sur un mini-ordinateur. Ce dernier utilise une logique par élimination/sélection qui permet de filtrer les réponses et donne un résultat unique. Après avoir fait une taxonomie à base de l'équation de la manutention d'Apple (1977), la base de connaissances d'EXIT est structurée en différents niveaux : méta niveau (connaissance de la connaissance), niveau 2 (type), et niveau 3 (modèle). Par cette architecture, il est capable de préciser la réponse et le choix jusqu'à sélectionner le modèle de l'équipement d'après son type. Son moteur d'inférence utilise la logique SI-ALORS, et certains concepts de l'intelligence artificielle tels que l'unification et les déductions périphériques. Les déductions périphériques sont utilisées lorsque, par exemple, l'utilisateur saisit « nombre = 3 », alors le système le considère comme « nombre = petite ». L'hypothèse de travail d'EXIT est de regrouper les activités de manutention associées aux

chariots dans cinq catégories : les opérations de quai, les opérations d'entreposage des unités de charge, les opérations de prélèvement, les opérations de manutention en cours, et les opérations de parc. Cela implique que les données de la base de connaissances soient limitées. Durant son utilisation, l'usager n'est pas assisté afin de limiter les erreurs. Les facteurs d'incertitude permettant de laisser une marge de manœuvre au choix du demandeur n'existent pas, mais les réponses du système sont catégoriques. EXIT manque aussi de capacité d'apprentissage et de sauvegarde de l'historique d'utilisation afin d'accélérer le processus de traitement. Toutefois, la classification des opérations de manutention proposée se rapproche des activités de l'entrepôt.

Trevino, Hurley, Clincy et Jang (1991) ont développé un système expert qui fait la sélection et l'évaluation de combinaison de technologies d'entreposage avec des chariots de manutention appelé SITSES. Il est composé de deux modules de quatre étapes chacun. Il s'exécute avec cinq chariots de manutention et trois technologies d'entreposage. Il est programmé en OPS 5 et reconnait huit hypothèses de conception pour trois différents types d'implantation des lieux. Cela rétrécit le champ d'utilisation d'autant plus que les nombres d'équipements de manutention et de technologies d'entreposage sont limités.

Bookbinder et Gervais (1992) présentent un système expert combiné à une méthode d'aide à la décision multicritère (MADM), adapté aux entrepôts comme aux usines. Ils incorporent 30 types d'équipements sous trois catégories avec treize propriétés logistiques.

Le système expert de Matson, Mellichamph et Swaminathan (1992) s'appelle EXCITE *(EXpert Consultant for In-plat Transport Equipment)*. Il compile les connaissances existantes et cherche à les améliorer afin de sélectionner les équipements de manutention d'une manière plus précise. Ils utilisent les suggestions faites, en matière de règles d'inférence et d'équipements-propriétés logistiques, dans la littérature publiée : livres (3), articles de journaux scientifiques (3) et magazines (Modern Materials Handling). De ce fait, EXCITE intègre 340 règles, 28 propriétés logistiques et 35 types d'équipements. Le langage de programmation utilisé est l'OPS83. Il se limite sur les mouvements interdépartementaux en usine en utilisant des produits distincts. Les équipements de manutention utilisés en entrepôt ne sont pas considérés, comme les chariots de préparation, et les ponts roulants.

L'article de Park (1996) décrit un système intitulé ICMESE *(Intelligent Consultant system for Material handling Equipment Selection and Evaluation)*. Ce dernier permet la sélection des équipements de manutention satisfaisant les mouvements et l'entreposage des produits de l'industrie. Tout le processus est exécuté sous l'environnement système expert VP-Expert. Sa base de connaissances a été compilée de données de livres, d'articles scientifiques et de magazines. Un total de 41 types d'équipements de manutention, neuf types de technologies d'entreposage utilisant 29 propriétés logistiques sous 336 règles sont stockés dans la base de connaissances. Les listes des modèles commerciaux avec leurs spécifications pour 41 types d'équipements de manutention sont enregistrées. La base de données est développée en utilisant dBASEIII Plus et la procédure de prise de décision multicritère est programmée avec FORTRAN 77. Des simulateurs permettant de mesurer la performance des équipements sont utilisés. Mais, les arbres de décision et les bases de données peuvent être améliorés et mis à jour.

Chan et al. (2001) utilisent dans son système expert : 112 règles, 50 types d'équipements de manutention et onze types d'équipement d'entreposage. Ce dernier ressemble au système ICMESE de Park (1996). Les catégories d'équipements considérés sont au nombre de sept : transporteurs, chariots de manutention, véhicules autoguidés, convoyeurs, ponts roulants, robots industriels, et transtockeurs. Les outils ART-IM Expert, Visual basic, ExpertChoice sont utilisés pour informatiser le système.

Fonseca, Uppal et Greene (2004) utilisent les mêmes outils que les systèmes experts qui l'ont précédé à savoir une base de connaissances, un moteur d'inférence et une interface utilisateur. La contribution est que ce travail traite particulièrement les transporteurs et les convoyeurs qui sont des équipements confondus en anglais. Le résultat est un système prototype informatisé développé avec Level V Object considérant 76 types de transporteurs et convoyeurs, ainsi que 25 propriétés logistiques.
La contribution de l'article de Kulak (2005) par rapport aux précédents est qu'il développe un système expert d'aide à la décision multicritère appelé FUMAHES *(FUzzy Multi-Attribute material Handling Equipment Selection)*. Il utilise une approche floue et axiomatique, avec 142 règles dans la base de données, 40 types d'équipements de manutention, et 22 propriétés logistiques. Les critères économiques et technologiques sont pris en compte pour la sélection. Une programmation en langage Arity PROLOG est adoptée. Mais, le caractère flou des données est un obstacle pour le choix effectif des équipements appropriés.
D'autre part, Tabibzadeh (1985), Hosni (1989), et Al-Meshaiei (1999) décrivent le fonctionnement du système expert de sélection des équipements de manutention. Ils indiquent la nécessité d'améliorer continuellement la base de connaissances et les règles de sélection, puisque les technologies changent.

3.3 Système hybride

Welgama et Gibson (1995) font une combinaison de trois approches à savoir : le système expert qui implique la base de connaissances, l'optimisation mathématique, et l'approche systémique qui considère, au-delà de la sélection d'équipements pour un mouvement donné, le système de manutention en entier. Ce dernier principe permet de mieux voir le problème et cherche à réduire les coûts totaux au lieu de considérer individuellement chaque équipement. Une modélisation mathématique du problème de sélection du système de manutention est proposée en tenant compte des coûts d'opération et d'investissement des équipements ainsi que les exigences d'espace d'allées. Un algorithme de résolution à neuf étapes utilisant les connaissances tacites du système expert est adopté. Néanmoins, la base de connaissances est réduite avec seize équipements et 112 mouvements. Les modèles de calcul des coûts et des temps d'opération tels que les temps de prise et de dépose sont simplifiés.
Mirhosseyni et Webb (2009) proposent un système hybride pour la sélection des équipements convenables pour chaque opération de manutention. En exploitant la logique floue, 38 règles sont utilisées par le système expert. Cela est combiné à un algorithme génétique. Les règles sélectionnent les types d'équipement susceptibles et l'algorithme assigne à chaque opération l'équipement le plus approprié parmi 27 types d'équipements de manutention. Ils sont regroupés dans six catégories et possèdent 21 propriétés logistiques (six des propriétés sont identifiées comme étant floues). Une informatisation avec C# est de mise. Mais, la méthode ne s'applique pas dans tous les secteurs de l'usine.
En comparant l'article de Welgama et Gibson (1995) avec les autres, les auteurs précisent qu'ils ont utilisé le guide de sélection proposé par Apple (1972) et ne donnent pas de détails sur les propriétés logistiques utilisées. Les seize types d'équipements qu'ils ont pris en compte sont : trois types de chariots élévateurs, deux types de portiques, trois types de ponts roulants, un chariot tracteur, un véhicule à guidage automatique, une grue mobile, un convoyeur tracteur, un transporteur à tablier à lattes, un transporteur à rouleaux, et un transporteur à chaine. Or, un véhicule à guidage automatique représente une catégorie d'équipements et non un type. Ceci engendre que les informations sur les technologies sont restées vagues dans l'article. Il est donc difficile de prouver la portée du système. Toutefois, les auteurs rappellent que ces informations

sont disponibles dans les livres (Allegri, 1984; Eastman, 1987) et les aides mémoires (Kulwiec, 2008; Lindkvist, 1985). La base de connaissances du système est inspirée de recherches antérieures (Fisher et al., 1988; Hosni, 1989). Par contre, le modèle d'optimisation est suffisamment illustré. C'est un algorithme d'optimisation basé sur les concepts des recherches de Webster et Reed (1971) et Hassan et al. (1985). Ce dernier considère le système de manutention en entier et cherche à minimiser les coûts et les espaces des allées. Il harmonise l'utilisation des différents types d'équipements susceptibles sélectionnés pour les différentes opérations de manutention entre départements.

De son côté, on remarque que Mirhosseyni et Webb (2009) proposent deux propriétés logistiques appelées « étape » et « occupation de l'allée ». Les valeurs de ces deux propriétés sont, soit oui, soit non. Le système exige à préciser la largeur de l'allée afin de choisir l'équipement qui est convenable. Il est évident que les équipements de manutention occupent l'espace disponible de l'allée de service à sens unique ou à double sens. Il est difficile donc d'imaginer l'utilité de ces deux variables.

En somme, on peut estimer que les systèmes hybrides ont leur place, car ils intègrent les systèmes experts et les modélisations mathématiques. Les modèles d'optimisation complètent les résolutions. Par exemple, après avoir fait le choix d'un type d'équipements de manutention, il serait convenable d'optimiser le nombre d'engins de ce type à employer ainsi que le modèle à acheter en fonction des critères de coût, de performance, de flexibilité, etc.

3.4 Système basé sur la connaissance

Gabbert et Brown (1989) proposent un système hybride basé sur la connaissance avec les techniques de l'intelligence artificielle et des sciences de la décision. Il est conçu pour un centre d'études du groupe General Electric. Les concepts de manutention, de transport, et d'entreposage sont confondus dans l'article et le nombre d'équipements pris en compte n'est pas précisé.

Le système informatique de Chu, Egbelu et Wu (1995) permet en deux étapes d'obtenir une liste classée d'équipements pour une opération de manutention. La première étape permet d'identifier les équipements éligibles et les classer selon le plus approprié vers le moins. La deuxième étape permet de faire une analyse économique de chaque équipement dans la liste selon quatre méthodes (la valeur actuelle, le coût annuel uniforme de l'équipement, le retour sur investissement, ainsi que la période de récupération). 77 types d'équipements (33 de manutention, treize manipulateurs, dix-sept unités de charge, quinze d'entreposage) et seize facteurs sous quatre familles (produits, mouvement, infrastructure, équipement) sont utilisés. Néanmoins, l'article considère les équipements d'entreposage et les unités de charges comme des équipements de manutention.

Yaman (2001) propose trois étapes de conception des systèmes de manutention (sélection, rationalisation, et utilisation et détails du système). Il utilise un système basé sur la connaissance avec sept catégories d'équipements de manutention et onze propriétés logistiques classées en produit et processus. La base de connaissances a été développée sous Leonardo Expert System Shell et le programme de rationalisation de la conception par remplacement avec FORTRAN. Toutefois, il est adapté aux usines et non aux entrepôts. Les types d'équipement et les propriétés logistiques ne sont pas exhaustifs.

Cho et Egbelu (2005) présentent un système appelé DESIGNER automatisant le processus de sélection des équipements de manutention et permettant de concevoir un système de manutention. Le système emploie des règles basées sur les connaissances et utilise 28 types d'équipements de manutention, cinq manipulateurs et sept technologies d'entreposage. Les équipements sont identifiés par 42 différentes propriétés logistiques. La logique floue est utilisée

pour lever les incertitudes du système et aussi pour pouvoir convertir les facteurs qualitatifs en mesures quantitatives. Le système permet aussi de concevoir un système de manutention en utilisant l'ensemble des équipements sélectionnés individuellement et cherche à optimiser leur utilisation en mettant en commun les équipements et minimisant le coût total. Malheureusement, des équipements d'entreposage se retrouvent parmi les équipements de manutention.
Les systèmes basés sur la connaissance utilisent la même logique que les systèmes experts. Sauf que les connaissances et les règles d'inférence ne relèvent pas d'un expert professionnel du domaine. Elles sont généralement inspirées de la littérature. Parfois, il s'avère que d'après le contenu de l'article la proposition est une solution hybride, ce qui provoque des interférences entre les approches.

3.5 Méthode d'aide à la décision multicritère

Chakraborty et Banik (2006) conçoivent un modèle de sélection des équipements de manutention avec la technique d'analyse hiérarchique multicritère (AHP). L'illustration de la technique avec quatre catégories d'équipements et onze paramètres est présentée. L'application avec des problèmes réels serait intéressante à analyser.
Onut, Kara et Mert (2009) emploient les approches fuzzy ANP et fuzzy TOPSIS. Le cas d'une entreprise qui fabrique de l'acier de construction est étudié avec cinq critères de décision (les contraintes de produit, de mouvement, de méthode, de coût, et de milieu). Les équipements de manutention sont les chariots de manutention, les transporteurs et convoyeurs, les systèmes sur rails, les véhicules à guidage automatique, et les grues fixes. Les techniques pourraient être appliquées à d'autres secteurs industriels.
Maniya et Bhatt (2011) proposent une méthodologie de prise de décision multicritère face aux véhicules autoguidés dans le domaine manufacturier. La démarche utilisée est une combinaison de deux méthodes qui sont l'AHP et l'analyse relationnelle grise modifiée (M-GRA). Elle est un ensemble de onze étapes. La méthodologie se limite sur les critères qualitatifs tels que la contrôlabilité, l'exactitude, le coût, la fiabilité, et la flexibilité des véhicules à guidage automatique. Dans ce domaine, Vis (2006) propose une revue de littérature sur la conception et le contrôle des véhicules à guidage automatique et identifie plusieurs pistes de recherche.
Tuzkaya et al. (2010) utilisent une autre méthode d'aide à la décision multicritère avec les approches fuzzy-ANP et fuzzy-PROMETHEE et des ensembles flous pour la sélection des équipements dans un entrepôt. Les démonstrations mathématiques sont fournies amplement. Ils utilisent dans le modèle quatre familles appelées considérations au lieu de propriétés logistiques, à savoir : considérations opérationnelles, considérations économiques, considérations environnementales, et considérations stratégiques. Un exemple d'application de la solution sur les chariots de manutention est illustré. Par contre, les types de chariots ne sont pas spécifiés. Ils indiquent simplement que six différentes possibilités sont susceptibles et qu'il faut choisir le meilleur chariot qui convient à l'opération.
Cependant, les méthodes multicritères ne mettent pas l'accent sur la question logistique du problème de sélection d'équipements de manutention. Une démonstration de l'applicabilité et le rapprochement à la réalité de la méthode sont aussi nécessaires. Les critères d'évaluation généralement proposés dans ces approches permettent de comparer des modèles d'un même type d'équipement. Afin de choisir entre différents types, les exigences de la tâche de manutention doivent être traitées. Cela permet de connaitre les valeurs des propriétés logistiques du type d'équipement de manutention convenable.

3.6 Approche-cadre systémique

L'article de Sharp et al. (2001) aborde le problème de sélection du système de manutention avec une approche en quatre étapes. Ces étapes sont : extraction de tâches, filtrage et appariement, agrégation de tâches, et sélection du système. Cinq outils d'analyse rapide sont proposés afin de réaliser la dernière étape.

Hassan (2010) propose un cadre de travail à dix étapes pour la sélection d'équipements de manutention dans les usines et les entrepôts, et décrit les facteurs qui influencent les décisions à prendre. L'auteur est inspiré par les concepts de l'« ingénierie système » et vise à travailler avec une équipe plus large en plus du concepteur. L'article souligne la complexité de la conception d'un système de manutention et la nécessité d'éclaircir le but et les fonctions du système de manutention dès le départ. Il rappelle aussi l'importance de considérer amplement l'environnement du système et son cycle de vie. Toutefois, une analyse exhaustive des opérations de manutention et des propriétés logistiques des équipements est requise pour faire une affectation pertinente « équipement-tâche ».

Ces approches-cadres dans la recherche de sélection d'équipements de manutention ont le point commun d'avoir une vision systémique. Il est nécessaire de considérer l'ensemble du problème et d'intégrer les autres aspects de la fonction de manutention afin de proposer une solution complète.

4 VALIDATION DES SYSTEMES

La validation des systèmes développés est nécessaire afin de prouver la praticabilité de la solution sur le terrain. Selon Al-Meshaiei (1999), il n'existe pas de méthode universelle, ce qui rend difficile cette étape de validation des systèmes et parfois absente. Toutefois, quatre méthodes sont généralement utilisées pour arriver à cette fin :

a. tester le système avec les données réelles d'une entreprise du terrain,
b. tester avec des données réelles empruntées à d'autres articles de recherche,
c. faire tester le système par certains professionnels spécialisés du domaine qui travaillent sur la sélection et la conception des systèmes de manutention,
d. faire une enquête sur le terrain en faisant tester le système par tous les utilisateurs potentiels afin de récolter toutes les appréciations, ce qui est particulièrement difficile en raison de leur grand nombre.

Ce ne sont pas tous les 27 systèmes développés ou les méthodes proposées qui ont été validées. La majorité des articles (19 sur 27) n'ont pas cherché à valider leurs solutions, mais ils ont plutôt utilisé des exemples d'application ou des exemples d'illustration. L'exemple est dit illustratif, car parfois il se réduit à expliquer le fonctionnement de quelques étapes du processus de sélection et aucun essai d'application totale n'est fourni.

Deux articles ont repris les données d'autres chercheurs pour valider les leurs (b). Hassan et al. (1985) ont emprunté les données de Webster et Reed (1971) et Hassan (2010) a emprunté les données de Maloney (2002).

Cinq recherches ont utilisé des données réelles pour valider leurs systèmes (a).

L'article de Hassan (2014) n'a pas présenté de méthode de validation (sans objet (s.o.)). Il compare la performance des systèmes experts.

Le Tableau 2 montre la méthode de validation utilisée par chacun des 27 articles.

Tableau 2 : Méthodes de validation des systèmes

Auteurs (Date)	Méthode de validation
Bookbinder et Gervais (1992)	Aucune (exemple)
Chakraborty et Banik (2006)	Aucune (exemple)
Chan et al. (2001)	a
Cho et Egbelu (2005)	Aucune (exemple)
Chu et al. (1995)	Aucune (exemple)
Fisher et al. (1988)	Aucune (exemple)
Fonseca et al. (2004)	a
Gabbert et Brown (1989)	Aucune (exemple)
Hassan et al. (1985)	b
Hassan (2010)	b
Hassan (2014)	s.o.
Kim et Eom (1997)	Aucune (exemple)
Kulak (2005)	Aucune (exemple)
Malmborg et al. (1989)	Aucune (exemple)
Maniya et Bhatt (2011)	Aucune (exemple)
Matson et al. (1992)	Aucune (exemple)
Mirhosseyni et Webb (2009)	a
Onut et al. (2009)	a
Park (1996)	Aucune (exemple)
Raman et al. (2009)	Aucune (exemple)
Sharp et al. (2001)	Aucune (exemple)
Telek (2013)	Aucune (exemple)
Trevino et al. (1991)	Aucune (exemple)
Tuzkaya et al. (2010)	a
Velury et Kennedy (1992)	Aucune (exemple)
Welgama et Gibson (1995)	Aucune (exemple)
Yaman (2001)	Aucune (exemple)

5 COMPARAISON DES METHODES DE SELECTION

Hassan (2014) a fait une évaluation de performance des systèmes experts développés pour la sélection des équipements de manutention. Cette évaluation est conduite sur les entrées et les sorties en utilisant la méthode DEA (Data Envelopment Analysis). Il est aussi possible de comparer toutes les solutions des différentes approches afin de connaitre les propositions qui ont été proches de la réalité. Ceci est réalisable en apportant une analyse des méthodes en fonction des équipements de manutention étudiés. Plus une recherche considère dans sa réflexion une longue liste d'équipements de manutention, plus elle analyse tous les aspects de ce problème. Autrement, les propositions seraient uniquement des démonstrations de certaines techniques, mathématiques et autres, utilisables pour traiter les problèmes de conception de système de manutention. Cela impliquerait que les apports tangibles, factuels et représentatifs de la complexité des équipements et des exigences des tâches de manutention manquent encore.

On remarque que les quatre modèles d'optimisation n'ont pas considéré clairement les types d'équipements de manutention. Certains articles font des démonstrations mathématiques des

approches des systèmes proposés sans préciser les choix d'équipements susceptibles à utiliser. Des considérations sur l'existence d'un nombre varié d'équipements de manutention sont faites. Par exemple, Hassan et al. (1985) supposent un nombre p d'équipements de manutention à tenir compte dans les calculs de l'algorithme. D'autres fournissent des exemples d'application pour illustrer l'utilisation de la solution, mais l'ampleur de son applicabilité n'est pas démontrée. Parfois, les catégories d'équipements sont simplement mentionnées vaguement (Chakraborty & Banik, 2006; Gabbert & Brown, 1989; Hassan, 2010; Maniya & Bhatt, 2011; Onut et al., 2009; Raman et al., 2009; Telek, 2013; Tuzkaya et al., 2010; Velury & Kennedy, 1992). Hassan (2014) ne propose pas de solution au problème de sélection. Travaillant pour l'industrie de l'assemblage électronique, Kim et Eom (1997) ne précisent pas les équipements de manutention dans leur système expert. Des catégories de ces équipements associées avec des technologies d'entreposage sont proposées.

L'analyse montre aussi que l'approche système expert est la plus pratique, vu le nombre d'équipements de manutention pris en compte et le nombre d'articles l'adoptant.

6 CRITIQUES

Cette revue de littérature sur la sélection des équipements de manutention regroupe les recherches (27 articles) des 30 dernières années (1985-2014). Elle a permis de marquer les limites de la recherche dans ce domaine, et on en retient les points suivants.

- La définition donnée aux équipements de manutention dans ces articles est à géométrie variable. La manutention est différente de la manipulation, et aussi différente de l'entreposage. Un équipement de manutention ne peut être utilisé pour entreposer des produits. De la même manière qu'un palettier n'est pas conçu pour déplacer une palette sur une distance.
- Le plus grand nombre d'équipements de manutention utilisés jusqu'à présent est de 50 types appartenant à six différentes catégories (Chan et al., 2001). Bien plus d'équipements existent sur le marché. Certains auteurs se limitent sur les équipements qui sont souvent utilisés dans leurs zones géographiques (Al-Meshaiei, 1999).
- La somme de toutes les propriétés logistiques décrites par les articles sans doublon est 111 propriétés. Certes, les recherches n'ont pas spécifiquement traité les mêmes cas de figure. Certains ont travaillé pour des entreprises spécifiques ou un secteur industriel ou avec une catégorie particulière d'équipements comme les transporteurs et convoyeurs. D'autres ont préféré donner simplement des exemples illustratifs de leurs solutions, ce qui n'implique pas une applicabilité à tous les problèmes de conception de système de manutention. Mais, le plus grand nombre de propriétés logistiques utilisé dans un seul article est de 42 propriétés regroupées sous quatre familles (général, produit, mouvement, ainsi qu'opération et traitement de données) de Cho et Egbelu (2005). Il est possible de travailler avec une liste de propriétés logistiques qui serait proche des 111 propriétés pour traiter le problème avec plus de données tout en veillant à ne pas complexifier le processus.
- Les différentes solutions et leurs champs d'application dans les recherches respectives sont décrits. Les premières méthodes ont été les modèles d'optimisation. Presque tous les chercheurs sont convaincus que plusieurs obstacles concernant le problème de sélection des équipements de manutention compliquent la tâche de ces solutions mathématiques. Ils les rappellent dans leurs introductions. « Les propriétés logistiques de chaque équipement sont difficiles à quantifier et à inclure dans un modèle, car elles sont qualitatives. Plusieurs fonctions objectifs sont nécessaires à la fois. Le problème devient combinatoire de forme j^i,

pour j nombre de type d'équipements et i nombre de mouvements. Les données requises pour résoudre le problème, comme les temps de mouvement et les coûts d'opération, sont souvent estimées, car elles sont difficiles à avoir. Il faudrait que le système soit opérationnel pour les connaitre, ce qui est prématuré » (Hassan et al., 1985).

- Une méthode plus proche au raisonnement de l'expert humain a fait son apparition et a été exploitée, c'est la méthode des systèmes experts. Mais, ces derniers donnent des réponses isolées de type d'équipements de manutention. Ils ne sont pas systémiques, car ils ne tiennent pas compte de tout le système de manutention. Toutefois, ils sont les plus utilisés dans la recherche. Les systèmes basés sur la connaissance sont de la même famille de cette approche sauf que les connaissances ne sont pas celles d'un expert humain, mais des livres. La plupart des systèmes s'arrêtent aux choix des types d'équipements. L'utilisateur voudrait bien connaitre aussi les modèles disponibles.
- Les récentes recherches ont utilisé des systèmes hybrides qui combinent les systèmes experts avec les modélisations mathématiques. C'est une approche intéressante qui permet d'utiliser les deux forces en même temps. Le système pourrait ainsi servir pour connaitre le type d'équipement convenable et le modèle mathématique optimiserait le choix d'un modèle et la détermination du nombre d'unités de ce modèle.
- Des méthodes multicritères sont aussi explorées par les chercheurs. Elles proposent des critères d'évaluation pour la sélection. Mais, nous estimons que la place de ces critères est dans la fonction objectif d'un modèle mathématique qui optimiserait le choix d'un modèle parmi plusieurs d'un seul type d'équipement. Un système expert ou un système à base de connaissances est nécessaire dans l'étape de sélection du type d'équipement afin d'analyser les propriétés logistiques.
- Lorsqu'il s'agit de choisir un modèle parmi plusieurs du type d'équipement de manutention sélectionné, des critères d'évaluation pourront être utilisés. Ces critères sont les coûts d'opération et d'investissement, ainsi que les critères de performance.
- Quelle est la meilleure approche pour résoudre le problème de sélection d'équipements ? Il est vrai que les systèmes experts sont les plus utilisés. Mais, la force des systèmes hybrides pourrait être plus exploitée.
- Le problème de sélection des équipements de manutention est presque toujours traité en solitaire. Il s'agit du cas où un utilisateur voudrait un seul équipement pour une opération de manutention connue dans une structure qui existe déjà. Peut-être parce que le concepteur doit gérer un nouveau produit ou parce qu'un équipement doit être remplacé à cause de sa capacité qui est devenue insuffisante, par exemple. La majorité des systèmes sont donc développés dans cet esprit. Mais, lorsqu'il s'agit de concevoir tout le système de manutention d'un entrepôt, par exemple, les solutions sont presque inexistantes. Certes, certains articles ont évoqué l'aspect systémique, mais ils se limitent à la conceptualisation.

7 CONCLUSION

La sélection des équipements de manutention est une décision stratégique dans la conception d'entrepôt ou d'usine. Plusieurs approches ont été explorées pour faire un choix d'équipement. Les systèmes experts sont les plus utilisés et reflètent mieux la réalité.

Néanmoins, ces méthodes présentées sont incomplètes. Le but réel des recherches dans la sélection des équipements de manutention est de développer un outil d'aide à la décision générique capable d'assister les concepteurs des systèmes de manutention. En plus des critiques faites ci-dessus, les systèmes disponibles sont limités :

- soit parce que la base de la connaissance contient une faible quantité d'informations et de données, ce qui engendre des décisions biaisées ou non optimales,
- soit parce que la méthode n'a pas été validée et aucune preuve n'est fournie pour montrer la praticabilité de la solution aux problèmes réels affrontés par les entreprises. Seulement cinq méthodes sur 27 ont été validées avec des données d'entreprises réelles,
- soit la solution est spécifique à une entreprise particulière, ce qui fait qu'elle soit inutilisable par d'autres.

D'autre part, il s'avère que :

- les recherches sur la sélection des équipements de manutention en entrepôt sont presque totalement absentes. La plupart des articles reflètent les cas d'usine. La manutention en entrepôt est à couvrir,
- la sélection des équipements d'entreposage seuls (qui sont différents des équipements de manutention) est aussi à traiter.

Les prochains systèmes de sélection des équipements de manutention devront s'affranchir des défauts cités ci-dessus et se rapprocher du terrain en proposant des systèmes robustes et performants.

L'objet des prochains travaux est d'abord d'analyser en détail les types d'équipements utilisés et leurs propriétés logistiques afin de constituer une base de la connaissance complète. Pour cela, il revient à exploiter la littérature spécialisée dans la manutention et ses équipements, ainsi que les catalogues des entreprises ouvrant dans le domaine.

Même si les systèmes experts sont les plus adaptés à cette problématique, l'intégration avec les outils d'aide à la décision est pertinente. Certains outils tels que la logique floue et la méthode AHP ont déjà fait leurs preuves dans les recherches.

8 REFERENCES

Al-Meshaiei, E. A. E. S. (1999). *An expert system for material handling equipment selection.* (Ph.D., University of Warwick, Warwick).

Allegri, T. H. (1984). *Materials handling: principles and practice*. Malabar: Krieger Pub. Co.

Apple, J. M. (1972). *Material handling systems design*. New York: Ronald Press Co.

Apple, J. M. (1977). *Plant layout and material handling*. New York: Wiley.

Beamon, B. M. (1998). Performance, reliability, and performability of material handling systems. *International Journal of Production Research, 36*(2), 377-393. doi: 10.1080/002075498193796

Bookbinder, J. H., & Gervais, D. (1992). Material-handling equipment selection via an expert system. *Journal of Business Logistics, 13*(1), 149-172.

Canalisation. (2012). Dans Office québécois de la langue française (Édit.), *Le grand dictionnaire terminologique*. Québec. Tiré de http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8972375

Chakraborty, S., & Banik, D. (2006). Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28*(11-12), 1237-1245. doi: 10.1007/s00170-004-2467-y

Chan, F. T. S., Ip, R. W. L., & Lau, H. (2001). Integration of expert system with analytic hierarchy process for the design of material handling equipment selection system. *Journal of Materials Processing Technology, 116*(2–3), 137-145. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01038-X

Cho, C., & Egbelu, P. J. (2005). Design of a web-based integrated material handling system for manufacturing applications. *International Journal of Production Research, 43*(2), 375-403. doi: 10.1080/0020754042000268866

Chu, H. K., Egbelu, P. J., & Wu, C.-T. (1995). ADVISOR: A computer-aided material handling equipment selection system. *International Journal of Production Research, 33*(12), 3311-3329. doi: 10.1080/00207549508904876

Eastman, R. M. (1987). *Materials handling*. New York: Marcel Dekker.

Fisher, E. L., Farber, J. B., & Kay, M. G. (1988). MATHES: An expert system for material handling equipment selection. *Engineering Costs and Production Economics, 14*(4), 297-310. doi: 10.1016/0167-188X(88)90034-1

Fonseca, D. J., Uppal, G., & Greene, T. J. (2004). A knowledge-based system for conveyor equipment selection. *Expert Systems with Applications, 26*(4), 615-623. doi: 10.1016/j.eswa.2003.12.011

Gabbert, P., & Brown, D. E. (1989). Knowledge-based computer-aided design of materials handling systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19*(2), 188-196. doi: 10.1109/21.31025

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research, 203*(3), 539-549. doi: 10.1016/j.ejor.2009.07.031

Hassan, M. M. D. (2010). A framework for selection of material handling equipment in manufacturing and logistics facilities. *Journal of Manufacturing Technology Management, 21*(2), 246-268. doi: 10.1108/17410381011014396

Hassan, M. M. D. (2014). An evaluation of input and output of expert systems for selection of material handling equipment. *Journal of Manufacturing Technology Management, 25*(7), 1049-1067. doi: 10.1108/JMTM-08-2012-0077

Hassan, M. M. D., Hogg, G. L., & Smith, D. R. (1985). A construction algorithm for the selection and assignment of materials handling equipment. *International Journal of Production Research, 23*(2), 381-392. doi: 10.1080/00207548508904715

Hosni, Y. A. (1989). Inference engine for material handling selection. *Computers & Industrial Engineering, 17*(1–4), 79-84. doi: 10.1016/0360-8352(89)90040-5

Kim, K. S., & Eom, J. K. (1997). An expert system for selection of material handling and storage systems. *International Journal of Industrial Engineering, 4*(2), 81-89.

Kulak, O. (2005). A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments. *Expert Systems with Applications, 29*(2), 310-319. doi: 10.1016/j.eswa.2005.04.004

Kulwiec, R. A. (Édit.). (2008). *Materials handling handbook* (2e éd.). New York: John Wiley & Sons.

Lindkvist, R. G. T. (1985). *Handbook of materials handling*. Chichister: Ellis Horwood.

Malmborg, C. J., Krishnakumar, B., Simons, G. R., & Agee, M. H. (1989). EXIT: a PC-based expert system for industrial truck selection. *International Journal of Production Research, 27*(6), 927-941. doi: 10.1080/00207548908942599

Maloney, D. (2002). Just what the doctor ordered. *Modern Materials Handling, 57*(2), 24-29. Tiré de http://search.proquest.com/docview/236622366/5518E23E1DEF4B76PQ/17?accountid=40695#

Maniya, K. D., & Bhatt, M. G. (2011). A multi-attribute selection of automated guided vehicle using the AHP/M-GRA technique. *International Journal of Production Research, 49*(20), 6124. doi: 10.1080/00207543.2010.518988

Matson, J. O., Mellichamph, J. M., & Swaminathan, S. R. (1992). EXCITE: Expert consultant for in-plant transportation equipment. *International Journal of Production Research, 30*(8), 1969-1983. doi: 10.1080/00207549208948133

Matson, J. O., & White, J. A. (1982). Operational research and material handling. *European Journal of Operational Research, 11*(4), 309-318. doi: 10.1016/0377-2217(82)90196-5

Mirhosseyni, S. H. L., & Webb, P. (2009). A hybrid fuzzy knowledge-based expert system and genetic algorithm for efficient selection and assignment of material handling equipment. *Expert Systems with Applications, 36*(9), 11875-11887. doi: 10.1016/j.eswa.2009.04.014

Onut, S., Kara, S. S., & Mert, S. (2009). Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44*(7-8), 818-828. doi: 10.1007/s00170-008-1897-3

Park, Y.-B. (1996). ICMESE: Intelligent consultant system for material handling equipment selection and evaluation. *Journal of Manufacturing Systems, 15*(5), 325-333. doi: 10.1016/0278-6125(96)84195-1

Raman, D., Nagalingam, S. V., Gurd, B. W., & Lin, G. C. I. (2009). Quantity of material handling equipment—A queuing theory based approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25*(2), 348-357. doi: 10.1016/j.rcim.2008.01.004

Riopel, D. (2012). *Implantation et manutention : notes de cours IND6209* (5e éd.). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

Riopel, D., & Croteau, C. (2013). *Dictionnaire illustré des activités de l'entreprise : industrie, techniques et gestion : français-anglais* (Édition mise à jour[e] éd.). Montréal: Presses internationales Polytechnique.

Sharp, G., Wan, Y.-T., McGinnis, L. F., Goetschalckx, M., Bodner, D., Govindaraj, T., . . . Everette, J. (2001). *A structured approach to material handling system selection and specification for manufacturing*. Communication présentée à Industrial Engineering Research Conference.

Syndicat des industries de matériels de manutention. (1983). Logistique. Dans *Encyclopédie de la manutention*. Paris: AFNOR.

Tabibzadeh, K. (1985). *An expert system approach to materials handling problems (Simulation, Software, Solving, Analytical)*. (Ph.D., University of Houston, Houston).

Telek, P. (2013). Equipment preselection for integrated design of materials handling systems. *Advanced Logistics Systems, 7*(2), 57-66.

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning* (4e éd.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Trevino, J., Hurley, B. J., Clincy, V., & Jang, S. C. (1991). Storage and industrial truck selection expert system (SITSES). *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 4*(3), 187-194. doi: 10.1080/09511929108944494

Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., & Özgen, D. (2010). An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications, 37*(4), 2853-2863. doi: 10.1016/j.eswa.2009.09.004

Velury, J., & Kennedy, W. J. (1992). A systematic procedure for the selection of bulk material handling equipment. *International Journal of Production Economics, 27*(3), 233-240. doi: 10.1016/0925-5273(92)90097-Q

Vis, I. F. A. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research, 170*(3), 677-709. doi: 10.1016/j.ejor.2004.09.020

Webster, D. B. (1969). *Determination of a materials handling systems decision model.* (Ph.D., Purdue University, Ann Arbor).

Webster, D. B., & Reed, R. (1971). A Material Handling System Selection Model. *A I I E Transactions, 3*(1), 13-21. doi: 10.1080/05695557108974781

Welgama, P. S., & Gibson, P. R. (1995). A hybrid knowledge based/optimization system for automated selection of materials handling system. *Computers & Industrial Engineering, 28*(2), 205-217. doi: 10.1016/0360-8352(94)00200-7

Yaman, R. (2001). A knowledge-based approach for selection of material handling equipment and material handling system pre-design. *Turkish Journal of Engineering And Environmental Sciences, 25*(4), 267-278.